東芝エネルギーシステムズ(株)における小型炉の開発

東芝エネルギーシステムズ 浅野 和仁

当社では、燃料無交換型ナトリウム冷却小型高速炉「4 S」(10 MWe, 50 MWe)¹⁾での経験や知見を活用・反映し、300 MWe クラスの高温ガス炉と 3 MWe 級の超小型炉(MoveluXTM: Mobile-Very-small reactor for Local Utility in X-mark)²⁾の開発を進めている。高温ガス炉は蓄熱システムを組み合わせることで、再生可能エネルギーの電力需給変動に対応可能なベースロード電源としての 600 MWt 級の発電プラントを指向し、国内技術として確立した技術をベースとした開発を進めている。並行して原子力イノベーションを追求した新たな概念として 10 MWt 級の超小型炉(MoveluXTM)の概念設計を進めている。本稿ではそれぞれの特徴について紹介し、今後の取組み方針ならびに課題について概観する。

KEYWORDS: HTGR, micro reactor, economics, passive safety

I. 高温ガス炉

優れた安全性と多目的利用に応え得る次世代炉として高温ガス炉の開発を進めている。高温ガス炉は発電だけでなく水素製造や産業プラント熱供給などへの用途に対応可能なポテンシャルを有する。当社は日本原子力研究開発機構の高温工学試験研究炉(HTTR)³⁾の設計、建設などにより得られた知見を基に経済合理性と安全性を兼ね備えた商用炉の開発を進めており、同機構ならびに富士電機株式会社、原子燃料工業株式会社等と連携し、2030 年代の上市を目標とする概念設計活動を進めている。高温ガス炉は 750 °C 以上の熱供給が可能であることから、適切な蓄熱システムを組み合わせることで再生可能エネルギーの電力需給変動に対する調整力を有したベースロード電源としての発電プラントを構成できる。国内技術として確立した高温ガス炉と蒸気発電技術に、実現性のある蓄熱システムを組合せることで、早期実用化と社会的要請に応える 600 MWt 級の高温ガス炉の開発を目指している。主要仕様を表 1 に示す。

安全性に関しては高温ガス炉固有の安全性の最大限の活用と最新知見に基づく安全性の向上を図り、社会的受

容性と経済性の両立を目指す。図 1 に技術概要と主な特徴を示す。

今後は 2030 年代に実現可能と考えられる商用高温ガス炉プラントおよび蓄熱システムの設計条件の検討を通じて全体システム構成の設定を進めるとともに、高温ガス炉の特徴を踏まえた安全シナリオ構築や確率論的リスク評価ツールの整備を通じて、規制側による安全性評価に向けた基本方針の策定を進める予定である。

- ① 原子炉压力容器：低合金鋼(Mn-Mo 鋼)によるコストダウン
- ② サイド・バイ・サイド配置：高温配管短縮、およびスリーベッセル構造概念による信頼性向上
- ③ 炉容器冷却設備：パッシブな自然循環冷却方式による事故時の崩壊熱除去
- ④ コンファインメント：被覆燃料粒子の高い閉じ込め機能と組み合わせた格納容器を不要とする閉じ込め機能概念
- ⑤ 蒸気発生器(He-蒸気)：負荷追従要求が少ない年代
中間熱交換器(He-溶融塩)：負荷追従要求が多い年代
- ⑥ 蒸気タービン発電：確立済み技術による早期実用化
- ⑦ 蓄熱槽：太陽熱発電で実用化されている高温・低温蓄熱システムと組み合わせることで負荷に応じた発電を行う

図 1 高温ガス炉の技術概要と特徴

表 1 高温ガス炉の主要仕様

炉型	ブロック型
冷却材	ヘリウムガス
熱出力／電気出力	600 MWt／約 240 MWe
一次系温度／圧力	750 °C (原子炉出口／4 MPa)
燃料	セラミック製被覆燃料粒子
運転サイクル	約 2 年

Development of SMR by Toshiba Energy Systems and Solutions : Kazuhito Asano.

(2019 年 11 月 21 日 受理)

II. 超小型炉(MoveluX™)

イノベーションを追求した原子力プラント開発の一環として、多様なエネルギー源と共存する 10 MWt 級多目的超小型炉の概念構築を進めている。本プラントはヒートパイプ採用による原子炉冷却系の動的機器排除および炉心の受動的除熱の実現、中性子減速には水素化カルシウムなどの固体減速材の適用により高温で受動的炉停止が可能な固有安全性を主たる特徴としており、約 700 °C の熱供給が可能な多目的かつ可搬性に優れた原子炉である。主要設計仕様とシステムイメージを表 2、図 2 にそれぞれ示す。

表 2 超小型炉(MoveluX™)の主要設計仕様

出力	10 MWt / 約 3 MWe
運転期間	> 10 年
減速材	水素化カルシウム (CaH ₂)
一次冷却システム	ヒートパイプ
炉心圧力	大気圧
濃縮度	5 wt% 未満
受動的崩壊熱除去	ヒートパイプ及び炉壁面からの空冷自然循環

図 2 MoveluX™の設置イメージ

課題となる経済性については、ヒートパイプの採用によるポンプレスな原子炉システムの実現とそれに伴う原子炉システムの簡素化・小型化を図るとともに、濃縮度 5 wt% 以下のウラン燃料を用いることによる燃料コスト低減などを通じて原子炉システムの設置・運転コストの低減を目指す方針としている。今後は最新の需要や顧客要望の調査・整理とそれに基づくシステム構成、炉心・除熱および安全システム・利用可能な材料候補選定など原子炉システム自体の成立可能性、分散型原子炉特有の規制・核セキュリティ・保障措置上の課題、潜在市場の調査を進める予定である。

III. まとめ

高温ガス炉はモジュールによる共通化、簡素化と習熟効果を狙いつつ、高温や固有安全の利点を便益にどのように取り込めるのか、その経済性評価に挑戦していく。超小型炉は、4S でも目指した砂漠緑化電源、地域分散電源や資源開発熱源にも活用できるポテンシャルを有する。ニーズの多様化がすすむ中、これまでにない一層多くのユーザーニーズに応えるべく、原子力イノベーションの追求に向け、宇宙開発用、大深度地下開発用、災害時対策用など、これまでの制約条件を一切取り払った柔軟な発想が求められるであろう。

— 参考文献 —

- 1) Y. Tsuboi, K. Arie, N. Ueda, T. Greci "Design of the 4S Reactor" Nuclear Technology, vol.178, No.2 201-217, 2012.
- 2) R. Kimura, et al, "The Conceptual Design of Heat-Pipe Cooled and Calcium Hydride Moderated vSMR", Proc. ICAPP2019, Juan- les- pins, France, May 12- 15, 083, ICAPP2019, 2019.
- 3) <https://htr.jaea.go.jp/>

著者紹介

浅野和仁 (あさの・かずひと)
東芝エネルギーシステムズ(株)
原子力先端システム設計部
(専門分野/関心分野) 安全解析, 新型炉
プラント開発